

ТЕХНОЛОГИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.771.073.8:681.3.06

В.С. МЕДВЕДЕВ, канд. техн. наук, НИИ «УкрНИИМет» УкрГНТЦ
«Энергосталь»

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И ЭНЕРГО - СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ В ФАСОННЫХ КАЛИБРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВАРИАЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ

Рассмотрена методика определения формоизменения и энергосиловых параметров прокатки с использованием вариационных принципов механики сплошных сред. На примере прокатки в базовом пластовом тавровом элементе фасонных калибров приведен алгоритм построения кинематически возможного поля скоростей течения металла, расчета деформации металла на свободных поверхностях, усилия, момента и мощности прокатки в фасонных калибрах.

Розглянута методика визначення формозміни та енергосилових параметрів прокатки за допомогою варіаційних принципів механіки суцільних середовищ. На прикладі прокатки в базовому пластовому тавровому елементі фасонних калібрів наведено алгоритм побудови кінематично можливого поля швидкостей плину металу, розрахунку деформації металу на вільних поверхнях, зусилля, моменту та потужності прокатки в фасонних калібрах.

The paper concerns the technique for determining of forming and energy parameters of rolling with using variation principles of continuum mechanics. By the example of rolling in the base bed T-shaped element of section grooves the algorithm of imaging kinematically possible velocity field of metal flow is presented along with calculating of metal deformation on free surfaces, efforts, moment and capacity of rolling in section grooves.

1. Введение

Разработка технологического процесса сортовой прокатки, основой которого является калибровка прокатных валков, связана с определением формоизменения металла в калибрах (уширения стенок, приращения или утяжки фланцев и других интегральных характеристик) и энергосиловых параметров (усилий, моментов и мощности прокатки).

В работах [1-4] изложены методы расчета формоизменения и энергосиловых параметров прокатки с использованием вариационных принципов механики сплошных сред. При решении задач используются разные методы построения кинематически возможного поля скоростей течения металла и системы допущений, касающиеся геометрии очага деформации, условий на контакте и внутри очага деформации, состояния деформируемой среды и т.д. Решения носят, как правило, частный характер.

В последние годы исследователями разрабатываются единые методологические подходы к вопросам разработки калибровок сложных фасонных профилей и расчета технологических параметров прокатки. Эти

подходы основаны на классификации сортамента сортового проката по признакам геометрического подобия профилей и общности их способов прокатки и калибровки [5-7]. Дальнейшим развитием и углублением такого системного подхода является деление сложных фасонных профилей и формующих их фасонных калибров на типовые базовые элементы с различными граничными условиями на концах этих элементов [8]. Всего выделено 5 базовых элементов: полосовой-клиновой, угловой, пластовый тавровый, ребровой тавровый и крестообразный. Сложные фасонные профили с развитой поверхностью в подавляющем большинстве могут быть составлены в разном сочетании и количестве тремя основными базовыми элементами: угловым, пластовым тавровым и ребровым тавровым. Например, швеллер состоит из двух состыкованных угловых элементов, симметричный полособульбовый профиль – из одного пластового таврового элемента, профиль железнодорожной полкладки – из двух состыкованных ребровых тавровых элементов.

2. Постановка задачи

В настоящей статье представлена общая методика определения формоизменения металла и энергосиловых параметров прокатки в основных базовых элементах калибров, представленных на рис.1 (стрелки показывают порядок теоретического анализа характерных участков очага деформации каждого базового элемента). Во всех случаях анализ базовых элементов профиля проводится в направлении беспрепятственного течения металла.

Методику определения формоизменения и энергосиловых параметров прокатки фасонных профилей изложим на примере деформации металла в пластовом тавровом элементе (рис.1,а и рис.2). Очаг деформации в этом элементе разделен на 8 характерных участков.

Для решения задачи принимаем следующие допущения:

1. Рассматривается только геометрический очаг деформации.
2. Фланцы обжимаются по толщине наклонными поверхностями валков.
3. По всей длине очага деформации имеет место отставание металла.
4. По высоте очага деформации имеет место равномерная деформация (гипотеза плоских сечений).
5. Законы затухания функций V_z и V_y – линейные.
6. Закон затухания функции V_x – параболический.
7. Внеконтактная деформация учитывается мощностью сил среза.
8. Металл является жестко-пластической средой.

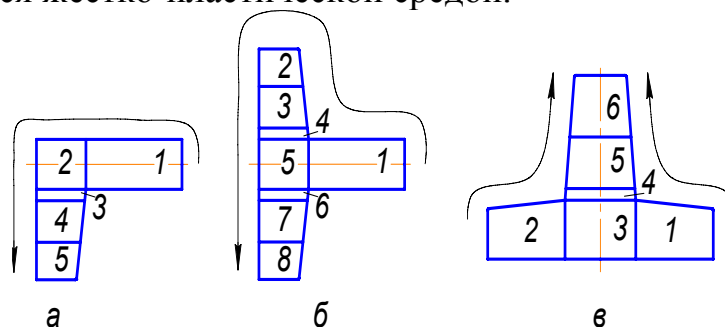


Рис. 1 – Типовые базовые элементы фасонных профилей
а – угловой; б – пластовый тавровый; в – ребровой тавровый.

3. Методика решения задачи.

Построение кинематически возможного поля скоростей производится поэтапно, начиная с основного участка 1 (стенки для углового и пластового таврового элементов или полки для ребрового таврового элемента), где производится прямое обжатие металла, и заканчивая последним j -м участком со свободным течением металла в поперечном направлении.

Участок 1: Сначала на участке 1 определяем вертикальную составляющую скорости V_{z1} . Исходя из принятых допущений, V_{z1} изменяется по линейному закону $V_{z1} = Az + B$, где A и B – коэффициенты, определяемые из граничных условий

$$V_{z1}\Big|_{z=0} = 0, \quad V_{z1}\Big|_{z=0,5H} = -V_0 \quad (1)$$

$$-V_0 = V_\epsilon \frac{x}{R_\epsilon}$$

Вертикальная составляющая скорости валка на контакте

С учетом граничных условий (1) получаем

$$V_{z1} = -\frac{2V_\epsilon xz}{HR} \quad (2)$$

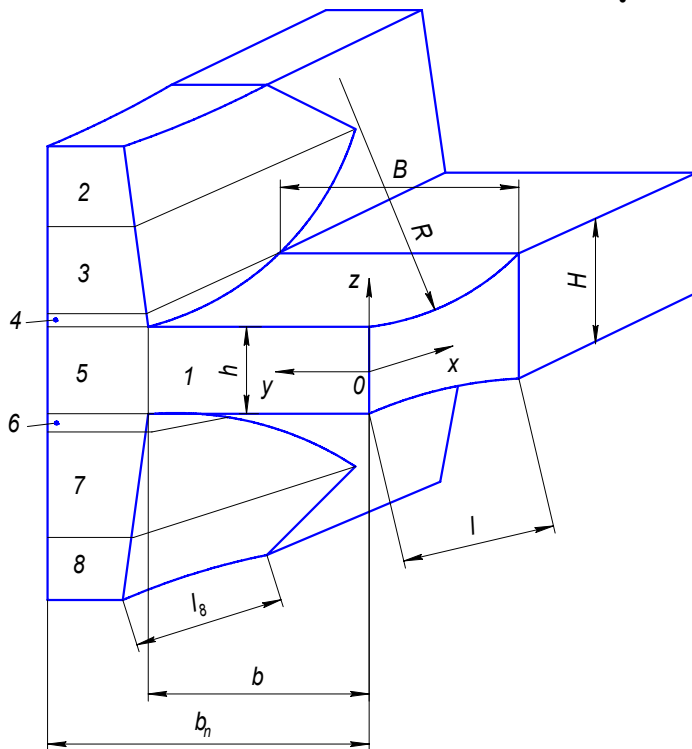


Рис. 2 – Очаг деформации в пластовом тавровом элементе

Продольная составляющая скорости изменяется по параболическому закону $V_{x1} = Ax^2 + B$, где A и B – коэффициенты, определяемые из граничных условий

$$V_{x1}\Big|_{x=0} = -V_\epsilon, \quad V_{x1}\Big|_{x=l} = -\frac{V_\epsilon}{\mu}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент вытяжки.

С учетом граничных условий (3) получаем

$$V_{x1} = V_{\epsilon} \left[\left(1 - \frac{1}{\mu} \right) \frac{x^2}{l^2} - 1 \right]. \quad (4)$$

Поперечную составляющую скорости V_{y1} находим из условия постоянства объема

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Подставив в уравнение (5) зависимости (2) и (4) и выразив из него V_{y1} , находим

$$V_{y1} = -y \left[\frac{2V_{\epsilon} x^2}{l_1^2} \left(1 - \frac{1}{\mu} \right) - \frac{2V_{\epsilon} x}{HR} \right] + C_1, \quad (6)$$

Постоянная интегрирования C_1 равна

$$C_1 = kV_0 + \frac{2Bx}{l} \left[\frac{V_{\epsilon} \left(1 - \frac{1}{\mu} \right)}{l} - \frac{V_0}{h(x)} \right],$$

где k – коэффициент, характеризующий положение поверхности раздела течения металла в поперечном направлении при свободном уширении стенки (при ограничении уширения стенки $k = 0$).

Коэффициенты μ и k являются варьируемыми параметрами.

Участки 2 – 8: Построение поля скоростей на участках 2 – 8 осуществляется при условии, что продольная составляющая скорости V_{xj} на всех участках одинаковая

$$V_{xj} = V_{x1}, \quad (7)$$

где j – номер участка, $j = 2 \dots 8$.

Исходя из принятых допущений, поперечная составляющая скорости V_{yj} изменяется по линейному закону $V_{yj} = Ay + B$, где A и B – коэффициенты, определяемые из граничных условий

$$\left. V_{yj} \right|_{y=B_n} = 0, \quad \left. V_{yj} \right|_{y=F_{yj}} = V_{yj}^k, \quad \left. V_{yj} \right|_{y=B} = V_{y1}, \quad \begin{matrix} j=2..4,6..8 \\ j=5 \end{matrix}, \quad (8)$$

где F_{yj} – уравнение поверхности вала на соответствующем участке;

V_{yj}^k – поперечная компонента скорости на контактной поверхности F_{yj} , равная

$$V_{yj}^k = -x \sin \varphi \cos \varphi \frac{V_{\epsilon}}{R_{\epsilon}}. \quad (9)$$

Тогда, учитывая граничные условия (8), поперечная составляющая скорости V_{yj} определяется следующими зависимостями:

$$V_{yj} \Big|_{j=2..4,6..8} = \frac{-x \sin \varphi \cos \varphi \frac{V_6}{R_6}}{F_{yj} - B_n} (y - B_n), \quad V_{yj} \Big|_{j=5} = \frac{V_{y1}}{B - B_n} (y - B_n). \quad (10)$$

Вертикальную составляющую скорости V_{zj} определяем из условия постоянства объема (5)

$$V_{zj} = - \int \left(\frac{\partial V_{xj}}{\partial x} + \frac{\partial V_{yj}}{\partial y} \right) dz + C_j. \quad (11)$$

Константы C_j определяются из соответствующих граничных условий.

Скорости деформации на j -х участках описываются следующими дифференциальными уравнениями

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xj} &= \frac{\partial V_{xj}}{\partial x}, & \varepsilon_{yj} &= \frac{\partial V_{yj}}{\partial y}, & \varepsilon_{zj} &= \frac{\partial V_{zj}}{\partial z}, \\ \varepsilon_{xyj} &= \frac{\partial V_{xj}}{\partial y} + \frac{\partial V_{yj}}{\partial x}, & \varepsilon_{yzj} &= \frac{\partial V_{yj}}{\partial z} + \frac{\partial V_{zj}}{\partial y}, & \varepsilon_{zxj} &= \frac{\partial V_{zj}}{\partial x} + \frac{\partial V_{xj}}{\partial z}. \end{aligned} \quad (12)$$

Интенсивность скоростей деформации на j -х участках

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{xj} - \varepsilon_{yj})^2 + (\varepsilon_{yj} - \varepsilon_{zj})^2 + (\varepsilon_{zj} - \varepsilon_{xj})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{xyj}^2 + \varepsilon_{yzj}^2 + \varepsilon_{zxj}^2)}. \quad (13)$$

Интенсивность нормальных напряжений для жестко-пластической среды принимается равной пределу текучести $\sigma_i = \sigma_s$.

Мощность внутренних сил

$$N_{вн.j} = \sigma_s \iiint_{V_j} \varepsilon_{ij} dV. \quad (14)$$

Мощность сил трения (мощность внешних сопротивлений)

$$N_{мп.j} = \psi \tau_s \iint_{F_j} V_{ск.j} dF, \quad (15)$$

где ψ – коэффициент, учитывающий зависимость сил трения от состояния трущихся поверхностей формы очага деформации [2]

$$\psi = f_y + \frac{R}{8h} (1 - f_y) \sqrt{f_y}, \quad (16)$$

где f_y – коэффициент трения в установившемся процессе прокатки [9]

$$f_y = k_n k_m k_v (0,55 - 0,00024 t), \quad (17)$$

k_n – коэффициент, учитывающий состояние поверхности и материала валков;

k_m – коэффициент, учитывающий содержание углерода в стали;

k_v – коэффициент, учитывающий скорость прокатки;

t – температура металла, °C.

Мощность сил среза, учитывающая скачкообразное изменение скорости в направлении обжатий на входе в очаг деформации, равна

$$N_{ср.j} = \tau_s \iint_{F_j} V_{ср.j} dF, \quad (18)$$

где $\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ – предел текучести при сдвиге (условие Мизеса); V_{cp} – скорость перемещения металла в плоскости среза.

Полная мощность прокатки состоит из мощности сопротивления внутренних сил, сил трения и среза

$$N_{\Sigma} = \sum_{j=1}^8 N_{вн.j} + \sum_{j=1}^8 N_{мп.j} + \sum_1^8 N_{ср.j} . \quad (19)$$

Варьируемые параметры μ и k определяем из условия минимума полной мощности [10]

$$\begin{cases} \frac{\partial N_{\Sigma}}{\partial \mu} = 0; \\ \frac{\partial N_{\Sigma}}{\partial k} = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Из известных отношений

$$\frac{de_x}{\varepsilon_x} = \frac{de_y}{\varepsilon_y} = \frac{de_z}{\varepsilon_z} = \frac{dx}{V_x} = \frac{dy}{V_y} = \frac{dz}{V_z} = const \quad (21)$$

находим деформацию металла (приращение открытого фланца) на свободной поверхности участка 8

$$e_{zz8} = \int_0^{l8} \frac{\varepsilon_{z8}}{V_{x8}} \Big|_{z=0.5H+H\phi_0}^{z=0.5H+H\phi_0} dx \quad (22)$$

и деформацию металла (уширение стенки) на свободной поверхности стенки участка 1 (при $k \neq 0$)

$$e_{yy1} = \int_0^{l1} \frac{\varepsilon_{y1}}{V_{x1}} \Big|_{y=0}^{y=0} dx \quad (23)$$

Момент прокатки

$$M = \frac{N_{\Sigma}}{V_{\epsilon}} R, \quad (24)$$

где R – катающий радиус валков.

Усилие прокатки

$$P = \sum_{j=1}^8 P_j, \quad (25)$$

$$P_j = \frac{N_{вн.j} + N_{мп.j} + N_{ср.j}}{\iint_{Fj} V_{zj}}. \quad (26)$$

В практических условиях усилие прокатки можно определить по выражению [11]

$$P = \frac{M}{2\psi l n_{\phi}}, \quad (27)$$

где ψ – коэффициент плеча момента при прокатке полос; $l = \sqrt{R\Delta h}$ – средняя длина дуги захвата; $\Delta h = \frac{S_0}{B_0} - \frac{S_1}{B_1}$ – приведенное обжатие; S_0 и S_1 – площадь поперечного сечения пластового таврового элемента до и после прокатки;

$n_\phi = \frac{P_c}{2B_c}$ – коэффициент формы калибра; P_c и B_c – средние периметр и ширина таврового элемента.

Компьютерная реализация математической модели производится с помощью программы MathCAD 13, которая на сегодняшний день является наиболее распространенным прикладным математическим пакетом, позволяющим решать дифференциальные уравнения теории пластичности и вычислять определенные интегралы сложных математических функций.

4. Выводы

Разработана методика определения формоизменения и энергосиловых параметров прокатки фасонных калибров с использованием вариационных принципов механики сплошных сред. На примере прокатки в базовом пластовом тавровом элементе приведен алгоритм построения кинематически возможного поля скоростей течения металла, расчета деформации металла на свободных поверхностях, усилия, момента и мощности прокатки в фасонных калибрах. Методику рекомендуется использовать при разработке калибровок валков и технологических процессов прокатки сложных фасонных профилей.

Список литературы: 1. Вариационные принципы механики в теории обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, В.Л. Колмогоров и др. – М.: «Металлургиздат», 1963. – 54 с. 2. Теория обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. – М.: «Металлургиздат», 1963. – 672 с. 3. Тарновский И.Я. Элементы теории прокатки сложных профилей / И.Я. Тарновский, А.Н. Скороходов, Б.М.Илюкович; – М.: Изд-во «Металлургия», 1972, – 352 с. 4. Илюкович Б.М. Алгоритм расчета параметров процесса прокатки в сортовых калибрах / Б.М.Илюкович, М.К. Измайлова, А.В. Шаповалов // Сортопрокатное производство: Отрасл. сб. науч. тр. – Харьков: УкрНИИМет, 1977. – С. 32 –35. 5. Грицук Н.Ф. Классификация сортовых профилей отраслевого и специального назначения / Н.Ф. Грицук, В.С. Медведев, Ф.А. Писаренко // Сортопрокатное производство: Отрасл. сб. науч. тр. – Харьков: УкрНИИМет, 1974. – С. 20–22. 6. Есипов В.Д. Технологическая классификация горячекатаных фасонных профилей // Бюллетень ЦНИИ ЧМ, 1988, вып. 24(1076). – С. 27–28. 7. Илюкович Б.М. Прокатка и калибровка / Б.М. Илюкович, Н.Е. Нехаев, С.Е.Меркурьев. Т.1 (Справочник). – Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – 506 с. 8. Медведев В.С. Системный подход к вопросу автоматизированного проектирования калибровок валков для прокатки сложных фасонных профилей // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 3. – С. 41–47. 9. Грудев А.П. Теория прокатки. – М.: Изд-во «Металлургия», 1988. – 240 с. 10. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Изд-во «Наука», 1969. – 420 с. 11. Чекмарев А.П. Теория продольной прокатки / А.П. Чекмарев, А.А. Нефедов, В.А. Николаев; – Харьков: – Изд-во Харьковского государственного университета, 1965. – 212 с.

Поступила в редколлегию 26.01.2009